

川东长兴组台缘礁滩相储层纵向非均质性 特征及形成机制

——以川东宣汉盘龙洞长兴组剖面为例

秦 鹏¹, 胡忠贵¹, 吴嗣跃², 左洛滔¹, 韩 露¹

(1. 长江大学 沉积盆地研究中心, 湖北 武汉 430100; 2. 中国石油西南油气田分公司川东北气矿, 四川 达州 635000)

摘 要: 近几年,随着四川盆地海相碳酸盐岩储层勘探的不断加强,碳酸盐岩储层强的非均质性已成为制约礁滩气藏勘探开发的现实问题。以川东宣汉盘龙洞长兴组典型台缘礁滩剖面为研究对象,通过对典型台缘礁滩野外剖面的精细观察,结合镜下薄片及岩矿资料分析,重点探讨了盘龙洞礁滩储层纵向非均质性特征及成因。剖面上礁滩体垂向上存在很强的旋回性和储层非均质性,其储集岩分布、储层厚度、白云岩化程度、溶蚀作用等受海平面周期性的升降变化影响而呈现周期性变化。礁滩储层非均质性受高能相带、海平面升降变化和建设性成岩作用的共同控制,高能相带控制储层原生孔隙的发育,决定了储层的沉积非均质性,白云岩化和溶蚀作用有利于礁滩体储层的形成,大气淡水淋滤改造对于优化储层具有关键作用,海平面升降变化决定了礁滩体旋回性发育,而建设性成岩作用的选择性改造深化了储层非均质性。

关键词: 长兴组; 台缘礁滩; 盘龙洞剖面; 储层非均质性; 形成机制

中图分类号: P618.130.2⁺1; P512.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)01-0061-14

Vertical heterogeneity and formation mechanism of the platform edge reef and bank reservoir in Changxing Formation of eastern Sichuan Basin

QIN Peng¹, HU Zhong-gui¹, WU Si-yue², ZUO Ming-tao¹ and HAN Lu¹

(1. Sedimentary Basin Research Center, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2. Northeast Sichuan Gas Field, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Dazhou 635000, China)

Abstract: Currently, with the strengthening of carbonate reservoirs exploration in Sichuan basin, strong heterogeneity becomes a practical problem which has seriously hindered the exploration and development of reef and bank gas reservoirs. With the typical reef and bank section of Changxing Formation as the research object, its external features were carefully observed in combination with the analysis of thin sections and rock data, and the authors investigated the reservoir heterogeneity features and formation mechanism of Panlongdong reef and bank profile in Changxing Formation of eastern Sichuan basin. The results show that a strong cyclicity and reservoir heterogeneity can be observed in the vertical direction of Panlongdong reef and bank facies. The reservoir rocks distribution, reservoir thickness, the degree of dolomitization and dissolution phenomenon exhibit cyclic variation with the cyclical change of the sea level. Reef and bank reservoir heterogeneity is controlled by high-energy

收稿日期: 2017-04-22; 接受日期: 2017-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402090); “十三五”国家科技重大专项(2016ZX05007002)

作者简介: 秦 鹏(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为沉积学, E-mail: 1175795775@qq.com; 通讯作者: 胡忠贵(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要从事储层沉积学方面的教学和科研工作, E-mail: hzg1978@yangtzeu.edu.cn.

sedimentary facies, changes of sea level and constructive diagenesis. The high-energy sedimentary facies is the key controlling element of primary pore, which determines the sedimentary heterogeneity. Dolomitization and dissolution are advantageous to the reef reservoir formation. Atmospheric fresh water leaching transformation plays a key role in optimization of the reservoir. Sea-level fluctuation determines the cyclicity of reef and bank development, and selective reform of constructive diagenesis deepens the reservoir heterogeneity.

Key words: Changxing Formation; reef and bank of platform edge; Panlongdong profile; reservoir heterogeneity; formation mechanism

Fund support: National Nature Science Foundation of China (41402090); National Major Science and Technology Project of Plan in 13th Five Year Plan (2016ZX05007002)

储层的非均质性具普遍性,对储层中油气的分布及油气藏的开发起决定性作用。目前国内许多学者在碳酸盐岩储层非均质性描述及表征层次、储层非均质性建模、地质统计学表征储层非均质性中的应用及储层非均质性控制因素等方面进行了研究和探讨,取得了一些认识和成果(胡宗全等, 1996; 强平等, 1998; 鲁新便等, 2003; 周进高等, 2003; 乔琳等, 2007),特别是对储层及储层非均质性控制因素的研究,虽然分析和表征方法不同,但核心思想与“三元控储”思想(马永生等, 2010)吻合,总体认为对礁滩储层主控因素的分析应该更加强调沉积环境、海平面升降及成岩作用的影响(Lucia, 1999; Moore, 2001; 马永生等, 2007; 赵雪凤等, 2009; 王丹等, 2013; 赵文智等, 2014; 沈安江等, 2015; 黎荣等, 2016)。目前,对川东长兴组生物礁、滩储层的研究颇多,研究内容与主要认识和国外基本一致。其中,白云岩的成因及其非均质性是川东地区白云岩储层研究的热点和难点,也是刻画储层分布规律的关键,相关研究成果较少。

位于川东北宣汉地区的盘龙洞长兴组剖面因生物礁保存完整、发育规模大、储集白云岩发育而倍受关注,针对该剖面的研究也较广泛,研究主要涉及沉积及岩相古地理、储层特征、成岩作用、白云岩成因、成礁生物演化与古环境变化及 P/T 界限等方面(牟传龙等, 2005; 李小燕等, 2009; 孙赛男等, 2011; Hu *et al.*, 2012; 赵锐等, 2014; 吴亚生等, 2015; 李秋芬等, 2015)。一般认为,该剖面生物礁、滩相储层的储集空间良好,优质储层发育主要受控于沉积微相、成岩作用及构造改造作用,其中白云岩化作用、溶蚀作用及构造作用对储层的影响作用最为显著。前人尽管对该剖面典型台缘生物礁研究取得了众多成果,但对礁滩储层非均质性的描述及成因分

析相对较少。基于此,本文拟以川东地区典型台缘礁滩剖面——盘龙洞剖面为重点解剖对象,开展礁滩储层非均质性及其形成机制的探讨研究,以期探寻有利储层发育规律。

1 盘龙洞剖面简介

地理上,盘龙洞剖面沿着四川省宣汉县百里峡风景区内鸡唱乡附近的公路展布,地层出露完整,地质现象明显;构造上属于大巴山-米仓山前缘地带;古地理上处于城口-鄂西海槽边缘。剖面上的长兴组发育典型的台地边缘型生物礁、滩(图 1),向东相变为台地前缘斜坡相与城口-鄂西海槽毗邻。其西侧的开县红花、宣汉河口同样属于台地边缘型生物礁,三者区域上具有一定的可比性。

剖面上,长兴组底部以发育碳酸盐缓坡沉积为特征,向上变为碳酸盐台地沉积。台地边缘发育较大规模的生物礁、滩沉积体,可进一步区分出台地边缘生物礁和台地边缘浅滩两种沉积类型。层序上可识别出两个 II 型三级层序,即 SQ1 层序和 SQ2 层序。三级层序特征明显,在 SQ1 层序中划分出 3 个准层序组、8 个准层序;SQ2 层序中划分出 2 个准层序组、6 个准层序。生物礁主要发育在 SQ1 层序的高位体系域,且礁体规模大,可识别出 3 期生物礁;滩体主要发育在 SQ2 层序中,细分出 2 期滩体沉积。通过野外剖面观察及室内镜下薄片鉴定发现,该剖面岩石类型丰富,如泥质灰岩、微晶灰岩、生屑灰岩、海绵礁灰岩、砂砾屑鲕粒灰岩等灰岩类微晶白云岩、粉-细晶白云岩、砂屑白云岩和残余颗粒白云岩等白云岩类,也发育灰岩和白云岩的过渡岩石类型。其中,白云岩中溶蚀孔洞普遍发育(图 2)。

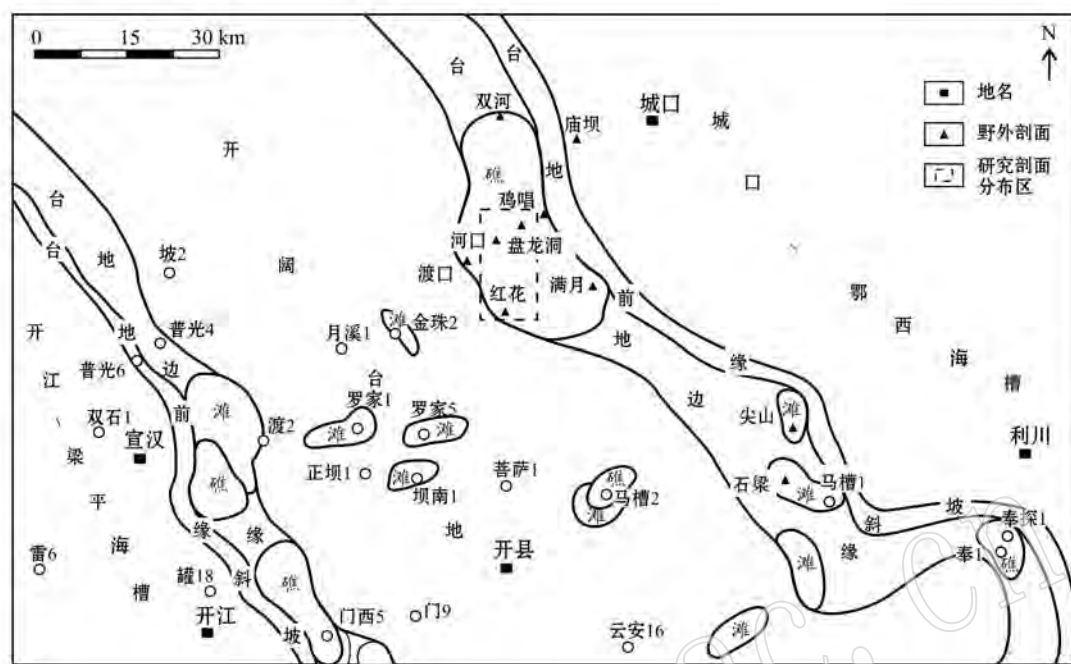


图1 川东-鄂西地区晚二叠世长兴期沉积格局

Fig. 1 Depositional pattern of Changxing phase of late Permian in eastern Sichuan-western Hubei area

2 储层特征及其非均质性

通过样品物性测试及镜下薄片观察统计,以2.5%的有效孔隙度为下限,对川东北地区盘龙洞长兴组剖面进行了系统的储集性分析,在礁、滩相中分别划分出2个储集段(图2)。下文将在储层基本特征分析的基础上,从沉积与成岩两方面对储层非均质性及其特征进行阐述。

2.1 储层基本特征

(1) 储集岩特征及分布

根据国内主要碳酸盐岩油气勘探成果和经验,生物礁相和颗粒滩相都是碳酸盐岩储层发育的优势相带(沈安江等,2015)。从盘龙洞剖面层序及沉积相划分的结果看,生物礁相主要分布在SQ1层序,浅滩相主要分布在SQ2层序(图2)。其中,生物礁相主要包括泥质灰岩、泥-微晶灰岩、生物屑灰岩、砂屑灰岩、生物礁灰岩、白云质生物礁灰岩、礁云岩以及微晶-粉晶白云岩,浅滩相主要有砂屑灰岩、砂屑白云岩、鲕粒灰岩、残余颗粒白云岩、鲕粒白云岩、粉-细晶白云岩以及泥-微晶白云岩。

从物性统计结果看,礁、滩相储层的发育程度对

岩性具有明显的选择性。礁相储集岩多为礁云岩;滩相储集岩主要为砂屑白云岩、鲕粒白云岩、晶粒白云岩。前人的研究成果分析(赵文智等,2014),盘龙洞剖面礁滩储层为礁滩型与白云岩型储层的复合体。由于礁间(礁基)、滩间相对致密灰岩的存在,形成了储层纵向、横向空间上分布的不均一性,具体体现在:礁体中礁基灰岩、礁核灰岩、礁顶潮坪泥-微晶灰岩类为非储集岩,礁核礁云岩形成储集岩;滩体中砂屑灰岩、滩间潮坪泥-微晶白云岩构成非储层,砂屑、生屑、鲕粒白云岩及(残余颗粒)粉-细晶白云岩构成储集岩。总体形成由非储层间隔的4套储层,储层段均分布于不同级次层序的高位体系域。

(2) 储集空间特征及分布

野外及薄片观察分析发现,研究剖面长兴组储集空间主要为孔隙型,可见粒间溶孔、粒内溶孔、晶间孔、铸模孔及溶洞等(图3、图4),也见压溶缝及构造裂缝。

礁体中的礁白云岩可见粒间溶孔,主要是颗粒(骨架)间的胶结物或部分颗粒(骨架)被溶蚀扩大的产物(图3b、3c、3d)。滩体中的砂屑白云岩(图4a)及鲕粒白云岩主要以粒内溶孔为主,这类孔隙可能为早期大气淡水对易溶颗粒选择性溶蚀的结果,也可

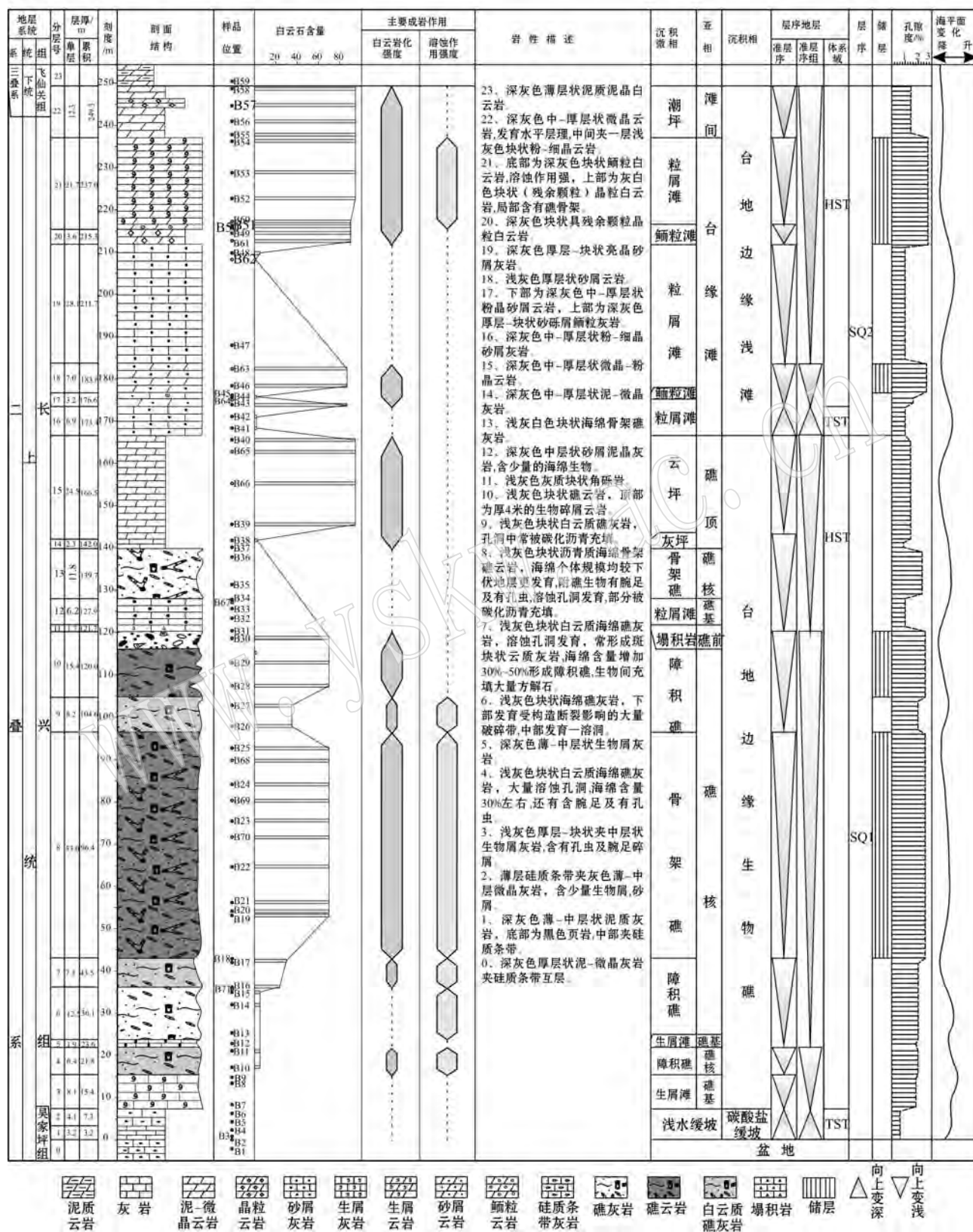


图2 盘龙洞剖面长兴组综合柱状图

Fig.2 Composite columnar section of Changxing Formation along Panlongdong profile

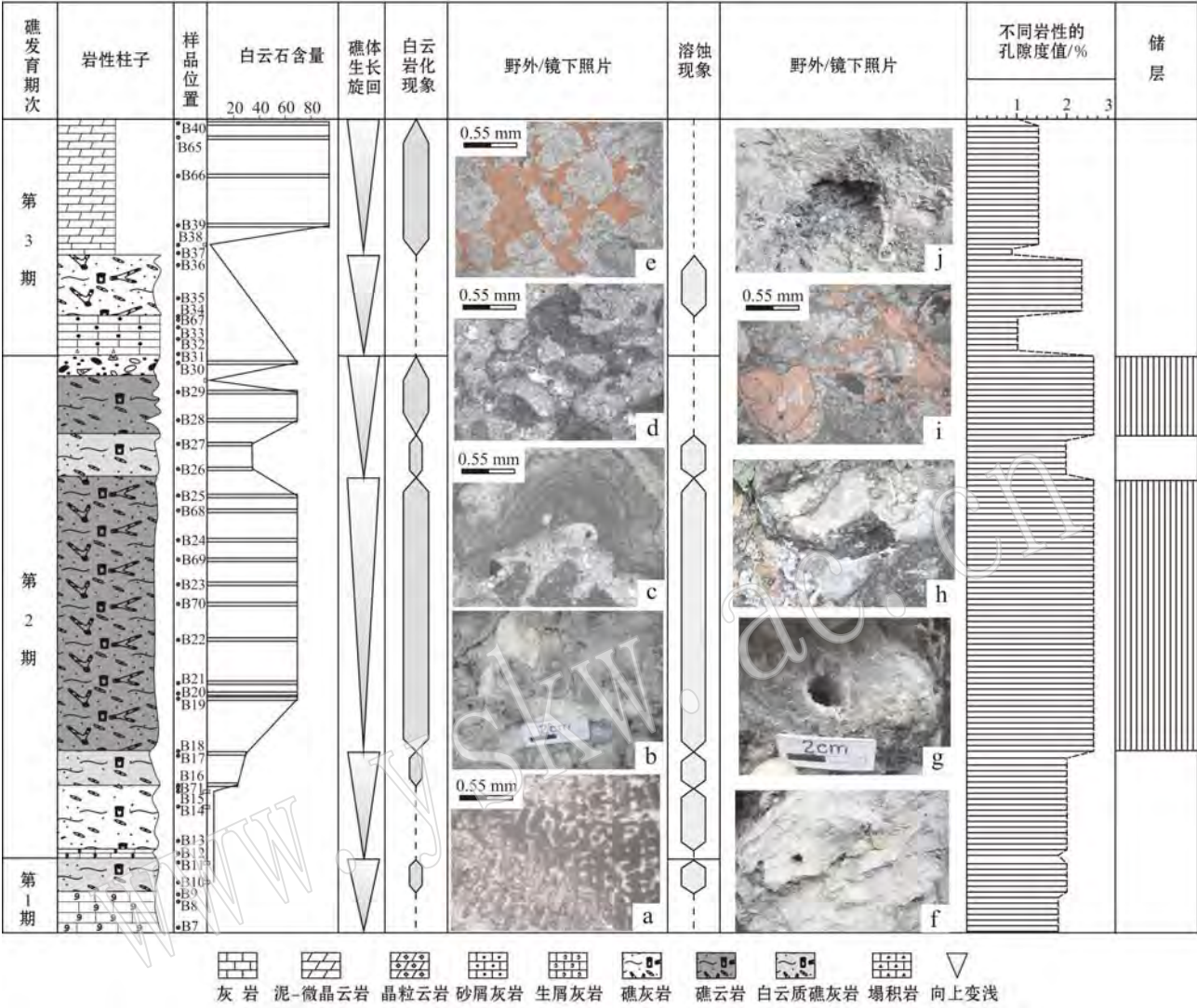


图 3 盘龙洞生物礁滩剖面生物礁储层非均质特征

Fig.3 Heterogeneity characteristics of reefs in Panlongdong organic Profile

a—海绵礁灰岩,第1期礁,第5层,B11(-); b—骨架礁云岩,第2期礁,生物格架孔隙发育,被亮晶方解石充填,第8层; c—骨架礁云岩,第2期礁,粒间溶孔发育,第8层,B24(-); d—海绵骨架礁云岩,第2期礁,粒间溶孔发育,第8层,B23(-); e—微晶-粉晶云岩,第3期礁顶,晶间孔及晶间溶蚀孔发育,被方解石充填,第15层,B40(-); f—灰白色块状云质礁灰岩,第1期礁,发育大量溶蚀孔洞,第5层; g—浅灰色块状礁云岩,溶洞礁发育,可见直径约13 mm的溶洞; h—浅灰色块状礁云岩,溶洞发育,洞内被方解石或碳化沥青充填,第8层; i—海绵礁云岩,第2期礁,骨架内溶孔发育,第8层,B21(-); j—灰色块状骨架礁灰岩,第3期礁,溶洞发育,洞内被方解石和炭质沥青充填,第13层,B35

a—sponge reef limestone, the first phase reef, 5th layer, B11(-); b—framework reef dolomite, the second phase reef, the pore of biological framework developed well and filled with calcite, 8th layer; c—framework reef dolomite, the second phase, the pore of grains developed well, 8th layer, B24(-); d—framework reef dolomite, the pore of grains developed, 8th layer, B23(-); e—microcrystalline dolomite, at the top of the third phase reef, the pore of grains and intercrystalline dissolution well developed and filled with calcite, 15th layer, B40(-); f—grayish white lumpy dolomitic reef limestone, the first phase reef, a number of solution vugs developed, 5th layer; g—light gray lump reef dolomite, the solution vugs developed well, solution vug with 13 mm diameter visible; h—light gray lump reef dolomite, the solution vugs developed well, and filled with calcite or carbonized pitches, 8th layer; i—sponge reef limestone, the second phase reef, the pore of inter-framework developed, 8th layer, B21(-); j—gray lumpy framework limestone, the third phase reef, solution caves developed and filled with calcite or carbonized pitches, 13th layer, B35

能是后期有机酸在早期大气淡水溶蚀基础上的叠加溶蚀改造;粉-细晶白云岩主要为晶间孔及晶间溶蚀扩大孔(图4c、4e、4f),可能是白云岩化过程中产生的“减体积效应”的结果。

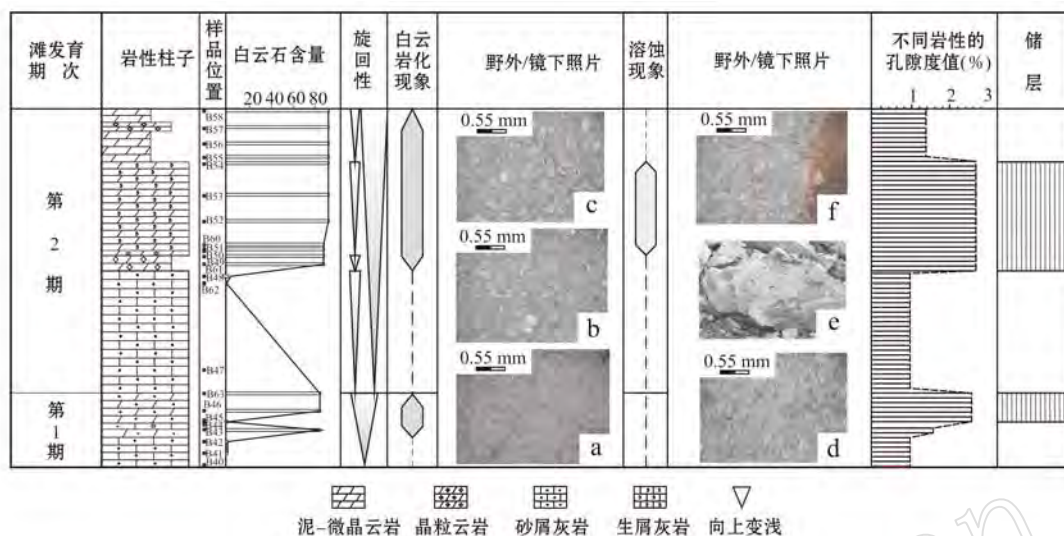


图 4 盘龙洞生物礁剖面滩体储层非均质性特征

Fig. 4 Heterogeneity characteristics of banks along Panlongdong organic profile

a—粉晶砂屑云岩, 第 1 期滩顶, 粒间孔发育, 第 17 层, B43(—); b—亮晶砂屑灰岩, 第 2 期滩底部, 白云石含量低, 第 18 层, B47; c—晶粒白云岩, 可见残余结构, 晶间孔发育, 被方解石充填, 第 21 层, B53; d—粉晶砂屑灰岩, 第 1 期滩底, 白云石含量低, 孔隙不发育, 第 16 层, B41; e—晶粒白云岩, 晶洞发育, 第 2 期滩中部, 第 21 层; f—晶粒白云岩, 可见残余结构, 溶蚀作用明显, 溶蚀孔被方解石充填, 第 21 层, B52
a—powder-fine arene dolomite, the top of the first phase bank, its pore of grains developed well, 17th layer, B43; b—arenite limestone, the bottom of the second phase bank, dolomite content low, 18th layer, B47; c—crystal grain dolomite relic structure visible, the pore of crystal grain developed well, and filled with calcite, 21th layer, B53; d—powder-fine arene limestone, at the bottom of the first phase bank with low dolomite and poor pores, 16th layer, B41; e—crystal grain dolomite, geode developed well, in the middle of the second phase bank, 21th layer; f—crystal grain dolomite layer, relic structure visible, the corrosion obvious and filled with calcite, 21th layer, B52

2.2 储层沉积成岩非均质性特征

盘龙洞剖面主要由台缘礁和台缘滩两大相带叠置组合而成, 可识别出两种类型的沉积旋回: 从下至上逐渐变浅和从下到上逐渐变深的沉积旋回。台缘礁相组合体的规模庞大, 总厚度可达 166.5 m, 主要发育在 SQ1 层序的高位体系域, 是多个向上水体逐渐变浅的沉积序列的组合; 台缘滩相位于礁体顶部, 厚度为 82.8 m, 主要发育在 SQ2 层序的高位体系域, 同样是多个水体向上变浅的沉积序列的组合。两者沉积厚度相差大、岩性区别明显, 加之成岩作用的改造, 进一步增强了其非均质性。

(1) 礁体沉积与成岩的非均质性特征

礁体可识别出 3 期生物礁的发育旋回, 每一期生物礁生长旋回在沉积厚度、岩性、白云岩化程度、溶蚀作用强度等方面存在明显的差异。由图 3 可知, 以第 2 期生物礁的沉积厚度及规模最大, 其造礁生物数量庞大, 含量大于 50%, 可进一步识别出 3 个向上逐渐变浅的次一级沉积旋回, 并且旋回间沉积厚度及岩性差异明显(图 2)。进一步分析 XRD 测试结果表明(图 3), 不同岩性白云石含量差异明显, 而

且, 正是岩性不同造成的礁体旋回性。由此判断旋回间白云岩化程度差异明显, 自下而上形成“中间厚, 上下薄”的特征。

礁体白云岩化现象具有“中间强、上下弱”的特点。3 期生物礁中以第 2 期礁的白云石含量居高, 且含量较稳定, 可见其白云岩化作用程度最高, 与第 1、2 期生物礁形成“中间强, 上下弱”的鲜明对比, 显示出极强的旋回间白云岩化非均质性。在第 2 期旋回中又可识别出 3 个次一级的白云岩化旋回, 以第 2 个次一级生物礁旋回的白云石含量较高, 同样呈现“中间强, 上下弱”的非均质性。此外, 第 1、2 期生物礁旋回内溶蚀孔洞发育, 第 3 期生物礁不发育, 呈现“中下强、上部弱”的现象。同时, 溶蚀作用主要发生在白云岩或白云岩化强的部位, 特别是在第 2 期次级礁旋回中, 发育大量 2~15 mm 的溶蚀孔洞, 明显区别于其它次级的生物礁旋回, 因而呈现出旋回内部强烈的非均质性(图 3)。

(2) 滩体沉积与成岩的非均质特征

生物礁的上部滩体发育 2 个(期)沉积旋回, 主体由含多种颗粒的粒屑滩和鲕粒滩构成(图 4)。

两期滩的沉积厚度、白云石含量及储层发育程度等方面具明显差异。白云石含量以旋回顶部最高,呈现白云岩化以旋回顶部最强,底部几乎不发生白云岩化,具有“顶强、底弱”的特点;而旋回的叠置又使白云岩化现象又呈现“弱强-弱强”的特点(图 4)。

尤其值得注意的是,第 2 期滩体发育的 4 个次级旋回中,除底部第 1 个次级旋回无白云岩化外,中上部 3 个次级旋回均发生强烈白云岩化。而且,第 3 个次级旋回主要为晶粒白云岩,溶蚀孔洞发育,与其上第 4 次级旋回和其下第 2 次级旋回对比鲜明,造成整个滩体表现出强烈的旋回非均质性。

3 储层非均质性成因

3.1 沉积条件奠定了储层非均质性基础

3.1.1 古地貌地形决定了高能相带分布

通过红花、河口、盘龙洞等相邻生物礁剖面对比

研究(图 5)发现,在同一体系域内,盘龙洞生物礁的旋回性更强,规模更大,厚度最大,原因在于盘龙洞剖面所处的古环境更有利于造礁生物的生长,古地貌相对更高,靠近广海一侧,水动力条件更强;与此同时,3 个剖面中也以盘龙洞剖面白云岩最发育,储集物性相对更好。可见水下古地貌高地是形成高能环境的基础,间接影响了储集岩的物性。

3.1.2 高能相带控制储层原生孔隙的发育

测试结果分析表明,盘龙洞一带长兴组的粉-细晶白云岩、鲕粒白云岩及骨架礁云岩的孔隙度相对较高(图 6、图 7)。进一步研究发现,这些白云岩原岩都是高能环境形成的台地边缘浅滩相颗粒灰岩或台地边缘生物礁灰岩。这两种环境均位于平均海平面和正常浪基面之间,水动力条件很强,形成的碳酸盐沉积物以颗粒或生物骨架为主,灰泥含量低,原生孔隙发育。也就是说,高能相带造就了碳酸盐岩储集岩原生孔隙发育。

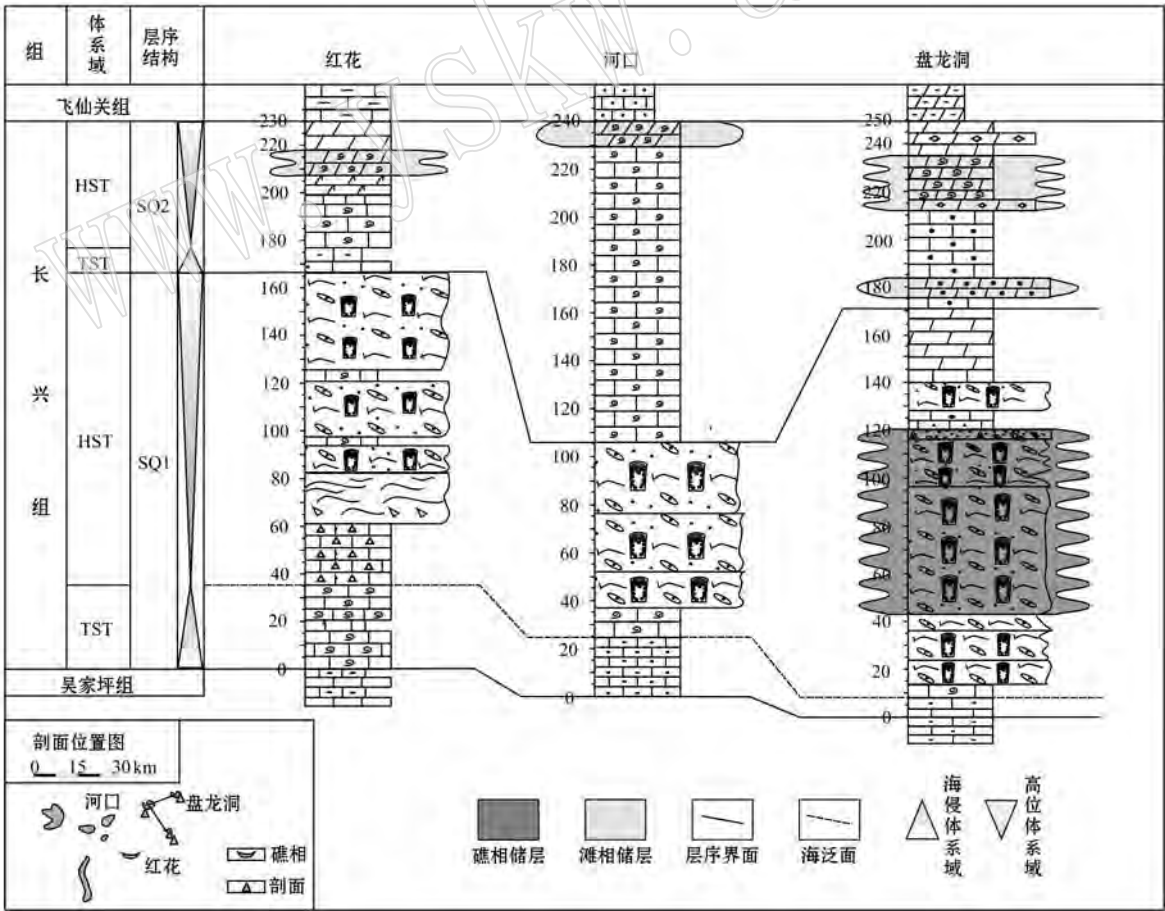


图 5 盘龙洞一带红花-河口-盘龙洞剖面生物礁滩相储层非均质特征对比图

Fig. 5 Comparison of heterogeneity characteristics of reefs and banks reservoir along Honghua-Hekou-Panlongdong profile

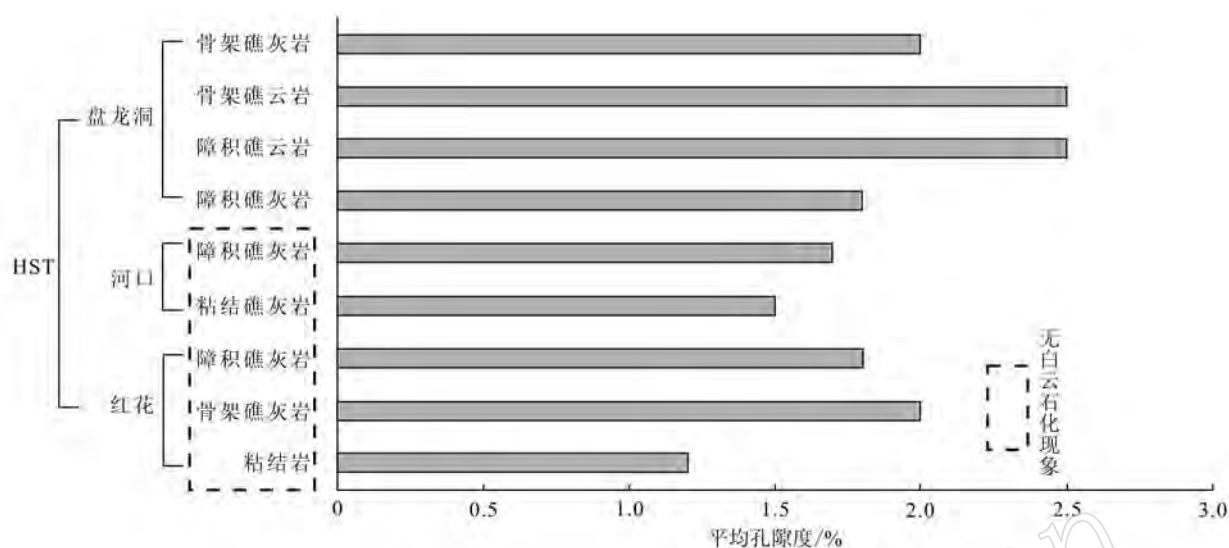


图 6 盘龙洞一带不同地区长兴组同一体系域内生物礁相岩性与孔隙度之间的关系比较

Fig. 6 Comparison of relationships between lithology and porosity in the same system tract of Changxing Formation along different zones of Panlongdong

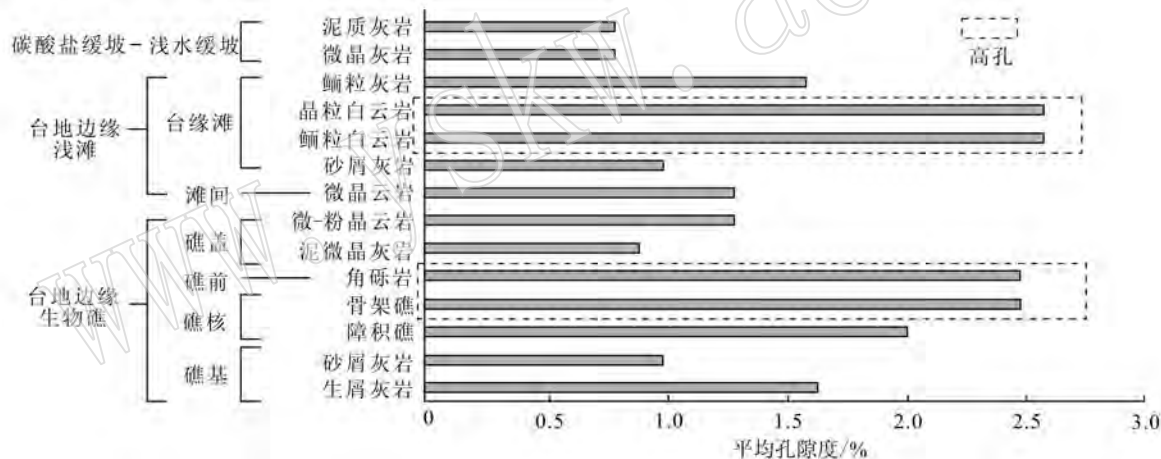


图 7 盘龙洞生物礁滩剖面沉积相、岩性与孔隙度之间的关系对比

Fig. 7 Comparison of relationships between sedimentary facies, lithology and porosity along Panlongdong profile

临近地区对比发现,盘龙洞一带的生物礁,以骨架礁灰岩为主,而红花、河口等地除了骨架礁灰岩外,还发育大量的藻粘结岩、障积礁灰岩和粘结-障积礁灰岩,由此导致前者地区的碳酸盐岩的白云岩化程度相对高,孔隙发育。由此说明,水动力条件较强的高能相带下形成的碳酸盐岩为储层发育奠定了基础。

3.1.3 海平面变化导致的旋回性造成储层非均质性

海平面升降变化造就了盘龙洞一带长兴组礁体的旋回性(图 8),这种旋回性不可避免地造成礁滩体储层物性的差异,即非均质性。

(1) 长兴初期,自东北向西南发生大规模的海

侵,在此过程中的某一时段内,古环境条件均满足造礁生物海绵的生长,因此在盘龙洞一带发育了底部第 1 期生物礁。由于海侵速度快,水体相对较深,造礁生物数量较少,以障积形式捕捉灰泥或生物碎屑,沉积物相对致密,导致原生孔隙相对不发育,沉积岩以相对致密的障积礁灰岩为主。

(2) 进入长兴中期,海侵规模减小,速度变缓,水体较为动荡,加之底部第 1 期生物礁发育造成的古地形的高地,使得各方面环境均接近海绵生物生长发育的理想条件,造礁生物数量空前繁盛。此时,造礁生物仍以海绵为主,但动荡的水动力条件使得海绵抗浪骨架极为发育,灰泥含量较少,骨架结构相

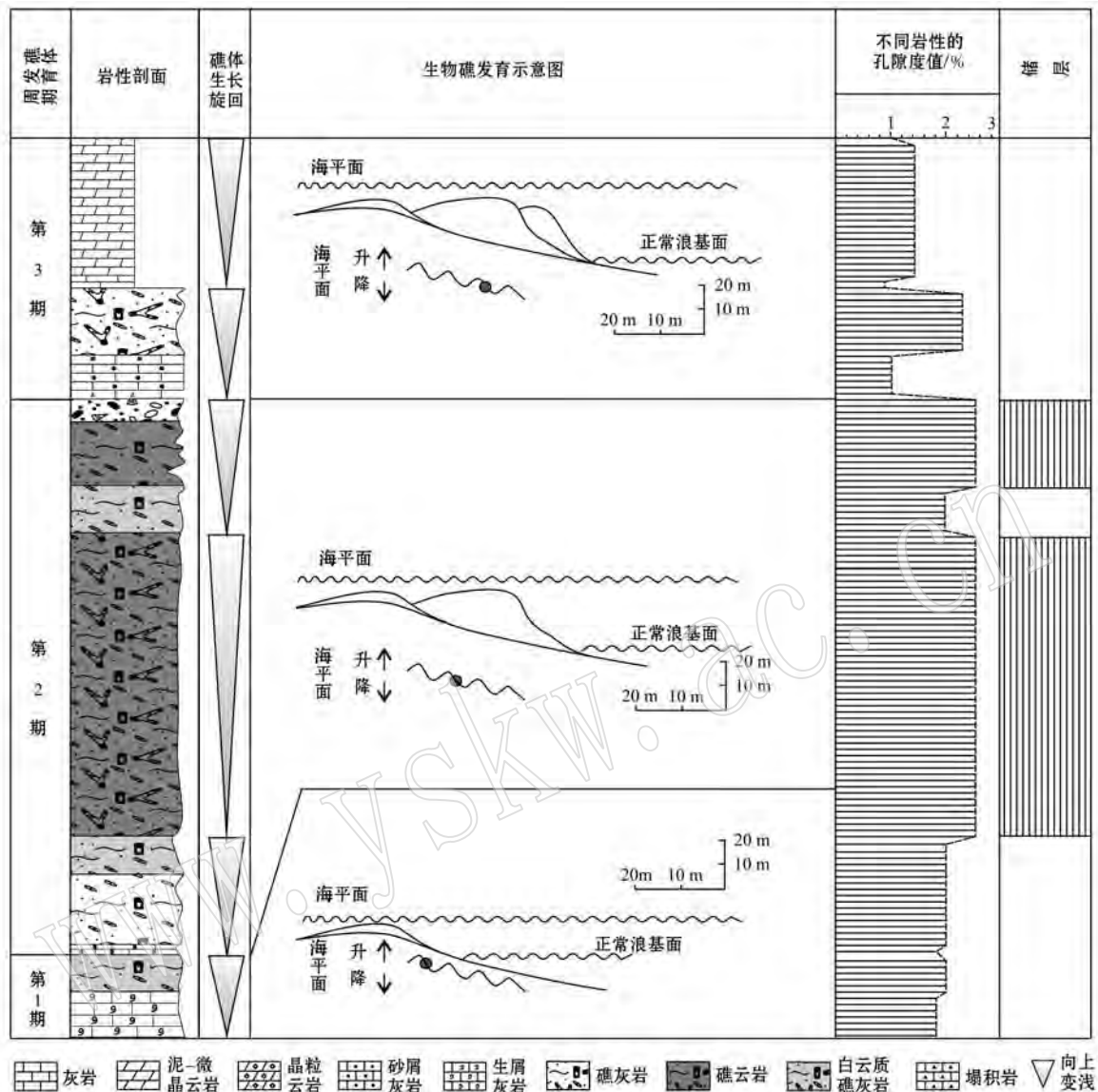


图 8 盘龙洞生物礁剖面生物礁旋回与海平面变化之间的关系

Fig. 8 Relationship between the cycle of organic reefs and sea level change along Panlongdong profile

对疏松,原生孔隙相对发育,形成的岩石以骨架礁灰岩为主。

(3) 进入长兴中晚期,水动力条件更为动荡,海侵规模持续减小,进而转为短暂快速的海退,此时,发育的第 3 期生物礁快速露出水面而停止生长,造礁生物仍以海绵为主。紧接着,海退转为海侵,水体相对较深,灰泥充填于骨架之间,导致原生孔隙多数被充填,从而形成岩性相对致密的骨架礁灰岩。

同样,海平面升降造成的滩体的旋回性,也形成了滩体储层的无形的差异,导致了滩体强烈的非均质性(图 9)。

(1) 继长兴中晚期海侵之后,水动力条件继续

动荡,第 1 期滩体发育在大规模的海退背景下,强的水动力条件使得颗粒间相对疏松,原生孔隙相对发育,岩性以颗粒灰岩为主。

(2) 第 2 期滩体发育时,海退持续扩大,水动力条件更为动荡,砂屑、鲕粒等相对发育,颗粒间灰泥含量少,原生孔隙较发育,以颗粒灰岩为主。

3.2 成岩作用增强了储层的非均质性

3.2.1 白云岩化和溶蚀作用有利于礁滩储层的形成

白云岩化和溶蚀作用是盘龙洞生物礁滩剖面主要的成岩作用类型,对储层具有显著的建设作用。储层段岩性均为颗粒白云岩(图 10a、10b),其白云石含量在 70 % ~ 90 % 之间,表明经历了较强的白云

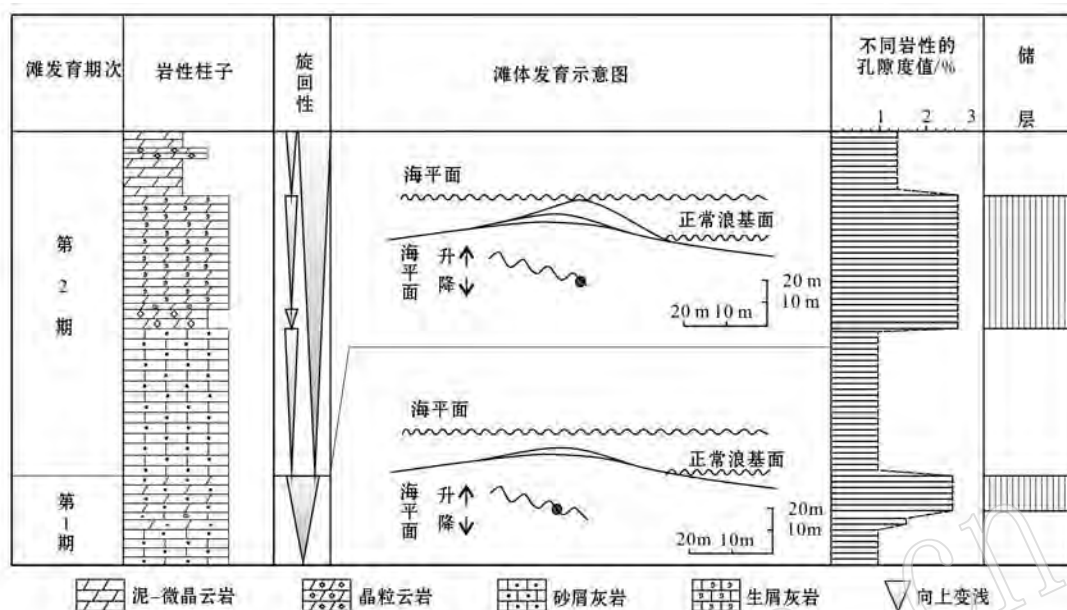


图 9 盘龙洞生物礁剖面滩体旋回与海平面变化之间的关系

Fig. 9 Relationship between the cycle of banks and sea level change along Panlongdong profile

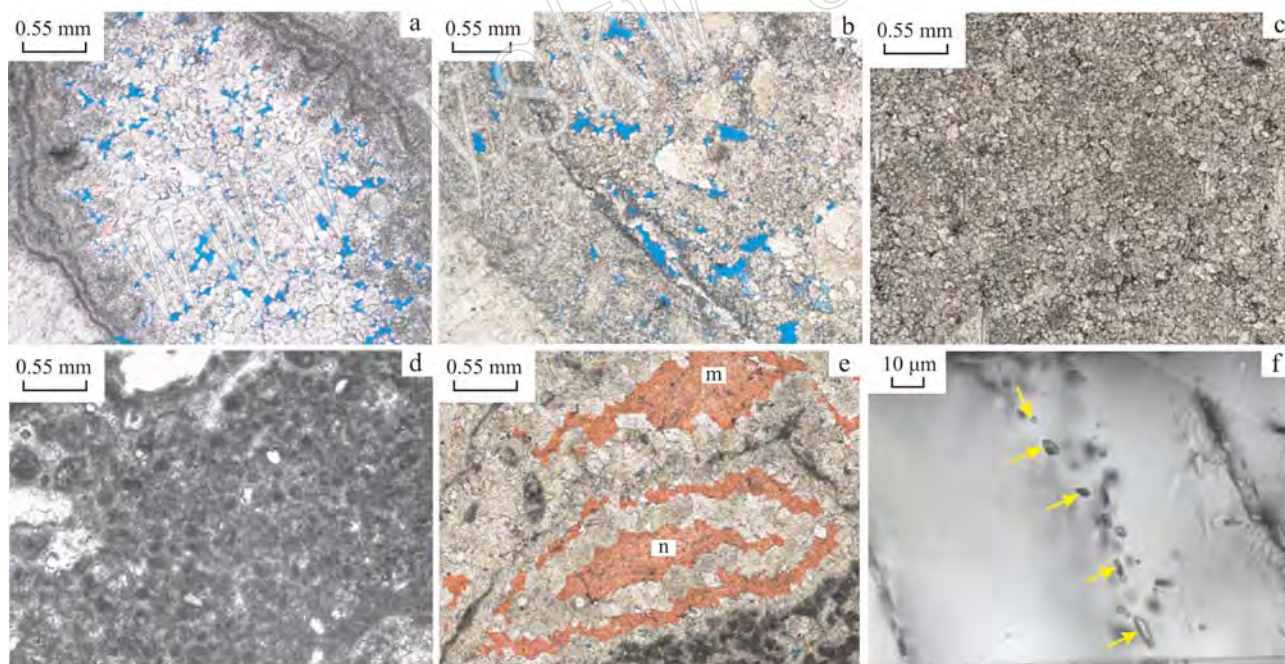


图 10 盘龙洞剖面典型孔隙类型及其结构图

Fig. 10 Typical pore types and structure of Panlongdong profile

a—生物礁云岩,粒内孔发育,盘龙洞 P-8-1,第 8 层,铸体染色薄片(-); b—生物礁云岩,晶间溶蚀孔、晶间孔发育,盘龙洞 P-10-1,第 10 层,铸体染色薄片(-); c—残余颗粒云岩,孔隙不发育,盘龙洞 P-21-1,第 21 层,铸体染色薄片(-); d—生屑灰岩,孔隙不发育,盘龙洞 P-5-1,第 5 层,铸体染色薄片(-); e—生物礁云岩,白云石晶体晶形完整且干净,晶粒较大,与淡水方解石 m、n 呈直线型接触,第 8 层,染色薄片(-); f—生物礁云岩,晶间溶蚀孔隙中淡水方解石盐水包裹体,盘龙洞 P-8-1,第 8 层,包裹体薄片

a—organic reef dolomite, the intragranular pore developed, Panlongdong-P-8-1, 8th layer, mold staining section (-); b—organic reef dolomite, intercrystalline solution pore and intercrystalline well developed, Panlongdong-P-10-1, 10th layer, mold staining section (-); c—relic grain dolomite, poor pores, Panlongdogn-P-21-1, 21th layer, mold staining section (-); d—detritus limestone, poor pores, Panlongdogn-P-5-1, 5th layer, mold staining section(-); e—organic reef dolomite, the crystalline form of dolomitic is intact and clean and the crystal is large, line contact with fresh water calcite (m, n), 8th layer, staining section (-); f—organic reef dolomite, inclusion in fresh water calcite of intercrystalline solution pore, Panlongdong-P-10-1, 8th layer, inclusion section

岩化。与未发生白云岩化或弱白云岩化的非储集岩相比,储层段储集岩具有较高的面孔率,且孔隙类型以晶间孔为主(图 10a),表明白云岩化有助于改善岩石孔隙结构,增加岩石面孔率,有助于储层的形成。与非储集段且白云石含量大于 70% 的白云岩(图 10c、10d)相比,通过微观孔隙形状、结构研究后发现,储集白云岩孔隙为晶间孔溶蚀扩大的产物(图 10b),而非储集段白云岩尽管其白云石含量高,但溶蚀作用弱或无溶蚀发生。所以,白云岩化和溶蚀的共同作用促成了礁滩储层的发育。

3.2.2 大气淡水淋滤增强了储层非均质性

前人在覆压条件下(沈安江等,2015),在不同温压条件下用 0.2% 乙酸与不同类型碳酸盐岩开展了溶蚀实验,结果显示溶蚀量与温度呈反比,与压力呈正比,且温度效应要大于压力效应,认为地表低温环境是碳酸盐岩规模溶蚀的有利环境。

除此之外,前人对盘龙洞生物礁、滩剖面礁白云岩、粉-细晶白云岩的地球化学特征研究成果(陈琪等,2012)显示,礁白云岩具“一散一负,二小,三低”的特征,即 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值离散, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 为负值, ΣREE 值和 LREE/HREE 值偏小, Na 、 Fe 、 Mn 含量低的特征。这些特征表明礁云岩形成于开放环境,经历了不同程度的大气淡水淋滤改造。颗粒白云岩具有“五高二低”的特征,即 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值略高于同期海水值, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值明显高于礁云岩,两者均具有高于同期海水浓缩的卤水特征,其 Na 、 Fe 含量及 Ca/Mg 值也较高。此外颗粒白云岩具有最低的 ΣREE 值和较低的 LREE/HREE 值,表明其形成于相对开放的、盐度高且富镁的环境,并经历了不同程度的大气淡水淋滤改造。

本文研究发现,礁白云岩中白云石晶体具有晶形完整、晶体较大且晶面相对干净的特征(图 10e);同时,淡水方解石(图 10e)与白云石之间多为直线接触,表明白云岩化作用后又发生了亮晶方解石对孔隙的充填作用。进一步分析礁云岩、方解石胶结物的碳氧同位素特征及亮晶方解石流体包裹体测试结果(图 10f)发现,礁云岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值离散, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 负偏;亮晶方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 在 $-3.165\text{‰} \sim 0.735\text{‰}$ 之间, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 在 $-5.351\text{‰} \sim -11.743\text{‰}$ 之间,整体偏负;方解石包裹体均一温度在 $80\text{℃} \sim 157\text{℃}$ 之间,但其盐度在 2.41 % 左右,均一温度和盐度总体偏低(测试数据均为长江大学沉积盆地研究中心实验室测试,

碳氧同位素数据为 Delta V Advantage 气体同位素质谱仪测试结果,包裹体温度、盐度数据为 XploRA Plus 型高性能全自动拉曼光谱仪测试结果)。综合分析认为,储集白云岩中的白云石与方解石胶结物形成于相对开放的环境,且经历了后期大气淡水的淋滤。

3.2.3 建设性成岩作用强化了储层非均质性

通过镜下铸体薄片观察并结合地球化学特征及包裹体测试结果分析后确定,白云岩化作用后,发生了亮晶方解石充填及同期溶蚀,最后的溶蚀作用形成现今的孔隙。也就是说,到成岩作用发展到一定阶段,白云石停止生长,生物体腔孔隙或其他原生孔隙得以残留保存,为淡水方解石的充填提供了有利的空间,即非均匀的白云岩化使得部分原生孔隙得以充填,部分原生孔隙得以保留。后期亮晶方解石对残余孔隙的充填,也使得残余孔隙部分被充填、部分保留,从而又进一步增强了储层非均质性。据此笔者推测:

(1) 生物礁发育第 1 阶段(图 11),沉积环境较为开阔,回流渗透白云岩化的条件不具备。在海平面下降期,礁体暴露于水面接受大气淡水淋滤。同时,岩性相对致密且礁体暴露时间短,仅在顶部形成大量溶蚀孔洞,并发生微弱白云岩化(图 10)。随着沉积作用的进行,礁体接受埋藏,大部分溶蚀孔洞或被压实、或被充填。

(2) 生物礁发育第 2 阶段(图 11),局部范围内环境局限,礁后礁体底部-中部可发生自内向外逐渐减弱的回流渗透白云岩化作用。之后伴随海平面下降,礁体长期暴露于水面之上,自上而下接受大气淡水淋滤的改造,使得回流白云岩化形成的孔隙得到改造,孔隙规模扩大,连通性增强,为流体的流动提供了良好通道。

(3) 生物礁发育第 3 阶段(图 11),快速海退导致礁体快速短暂暴露地表,使得礁体来不及或短暂发生回流渗透和大气淡水淋滤改造。几乎无白云岩化及溶蚀现象。

同样,建设性成岩作用增强了滩体储层的非均质性。第 1 期滩体形成阶段,一定范围内可形成局限环境,发生回流渗透白云岩化。随后,海平面下降使得滩体较长时间暴露,受到大气淡水淋滤改造,扩大了滩体孔隙的规模。之后,埋藏成岩过程中,前期形成的孔隙因压实而部分保留,成为流体运移的通

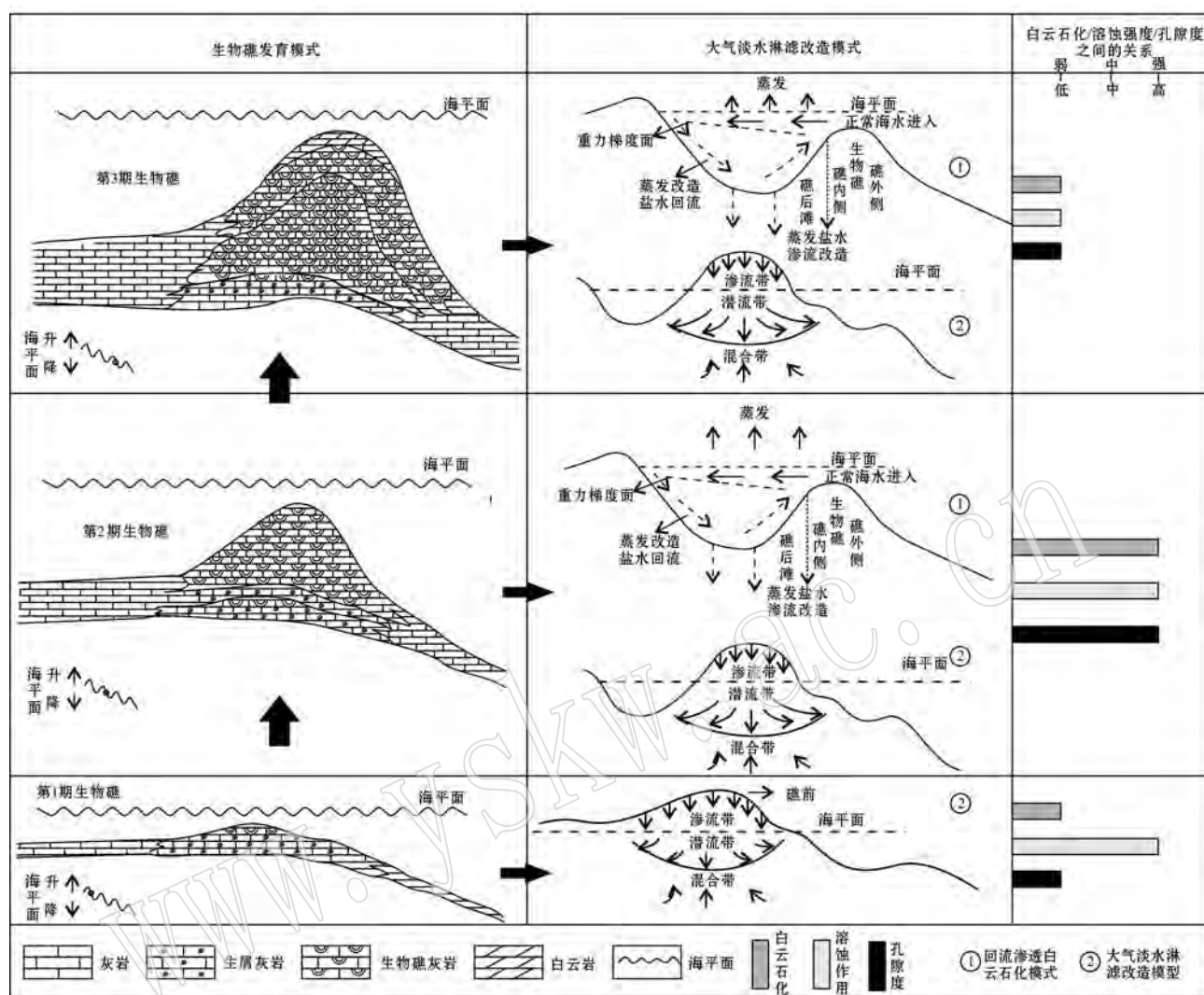


图 11 盘龙洞生物礁剖面白云岩化、溶蚀作用及孔隙度与生物礁生长之间的关系

Fig. 11 Relationship between dolomitization and dissolution and development of reefs along Panlongdong organic profile

道,为后续进一步成岩创造了条件。第 2 期滩体发育阶段,经历回流渗透白云岩化改造之后,同样经历了长时间暴露,并接受大气淡水的长时间改造,使得孔隙规模化发育,为之后的成岩流体的流动提供有利的通道。

综上所述,白云岩化和大气淡水淋滤的联合作用,增强了储层的非均质性。

4 结论

(1) 盘龙洞长兴组生物礁、滩剖面划分出 4 个储集段,主要为台地边缘礁相和台地边缘浅滩相,岩性以礁云岩、鲕粒白云岩和粉-细晶白云岩为主,具有白云岩化强、溶蚀作用强及储集性较好的特点。

(2) 盘龙洞剖面生物礁规模大,旋回性强;台地边缘滩规模虽小,但旋回结构明显。白云岩化和溶蚀多发生在旋回顶部,且旋回内白云岩化具有“中间强,上下弱”的特点;而溶蚀作用则具有“礁相比滩相发育”的特点。储层发育段具有“白云岩化、溶蚀作用均强,滩相白云岩物性更好”的特点。区域上,不同沉积背景、同一体系域内礁滩相储层也存在较强非均质性。高地形、高能环境形成的储集岩物性更好。

(3) 礁滩储层非均质性受海平面升降、高能相带和建设性成岩作用的共同控制。海平面升降导致了礁滩体旋回性;高能相带控制储层原生孔隙的发育,造成了储层的原生非均质性;白云岩化、溶蚀作用和大气淡水淋滤等建设性成岩作用改善了储层的

储集性,进一步增强了储层的非均质性。

References

- Chen Qi, Hu Wenxuan, Li Qing, *et al.* 2012. Characteristic and genesis of dolomitization in Changxing and Feixianguan Formation in Pandongdong, northeastern Sichuan Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 33(1): 84~93(in Chinese with English abstract).
- Hu Mingyi, Hu Zhonggui, Qiu Xiaosong, *et al.* 2012. Platform edge reef and bank structure and depositional model of Changxing Formation in Panlongdong section, Xuanhan, northeastern Sichuan [J]. *Journal of Earth Science*, 23(4): 431~441.
- Hu Zongquan and Chen Youlian. 1996. The heterogeneity of carbonate reservoir and its main controlling factors[J]. *Mineral Petrol.*, 16(4): 135~141(in Chinese with English abstract).
- Li Rong, Hu Zhonggui, Zhang Hang, *et al.* 2016. Depositional pattern and reservoir distribution of Changxing Formation intra-platform reef and shoal in Wolonghe-Yangduxu zone of eastern Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34(5): 973~982(in Chinese with English abstract).
- Li Qiufen, Miao Shunde, Jiang Qingchun, *et al.* 2015. Sedimentary characteristics and reef-forming model of Changxing Formation in Panlongdong section of Xuanhan, Sichuan[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 45(5): 1 322~1 331(in Chinese with English abstract).
- Li Xiaoyan, Wang Qi, Zhang Rui, *et al.* 2009. Reservoir characteristics and main controlling factors of Upper Permian Panlongdong organic reefs in northeastern Sichuan[J]. *Natural Gas Geoscience*, 20(1): 63~69(in Chinese with English abstract).
- Lu Xinbian and Wang Shimin. 2003. Application of fractal techniques in heterogeneous carbonate reservoir[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 42(3): 309~312(in Chinese with English abstract).
- Lucia F J. 1999. *Carbonate Reservoir Characterization*[M]. Berlin: Springer-Verlag.
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong, *et al.* 2010. Formation mechanism of deep-buried carbonate reservoir and its model of three-element controlling reservoir: A case study from the Puguang Oilfield in Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(8): 1 087~1 094(in Chinese with English abstract).
- Ma Yongsheng, Guo Tonglou, Zhao Xuefeng, *et al.* 2007. Reservoir mechanism of high-quality dolomite deep in Puguang gas field[J]. *Science China Press*, 37(S): 42~52(in Chinese with English abstract).
- Moore C H. 2001. *Carbonate Diagenesis and Porosity*[M]. Amsterdam: Elsevier.
- Mou Chuanlong, Ma Yongsheng, Wang Ruihua, *et al.* 2005. Diagenesis of the upper Permian Panlongdong organic reefs in northeastern Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 25(3): 198~202(in Chinese with English abstract).
- Qiang Ping, Zeng Wei, Chen Jingshan, *et al.* 1998. Heterogeneous models of carbonate reservoirs in eastern Sichuan[J]. *Oil and Gas Geology*, 19(3): 205~210(in Chinese with English abstract).
- Qiao Lin, Shen Zhaoguo, Fang Shaoxian, *et al.* 2007. The main controlled factors of heterogeneity of middle Ordovician Majiagou 51-4 reservoir in Jingbian buried platform and its periphery area, Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 12(1): 12~20(in Chinese with English abstract).
- Shen Anjiang, Zhao Wenzhi, Hu Anping, *et al.* 2015. Major factors controlling the development of marine carbonate reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 42(5): 545~554(in Chinese with English abstract).
- Sun Sainan, Zhou Jingao, Hao Yi, *et al.* 2011. A sedimentary model of changing and Feixianguan reservoirs around Kaijiang-Liangping trough in Sichuan Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 16(3): 45~54(in Chinese with English abstract).
- Wang Dan, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, *et al.* 2013. Reef-bank reservoir characteristics and main control factors of the Changxing Formation in Jiannan area[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(4): 538~548(in Chinese with English abstract).
- Wu Yasheng, Jiang Hongxia, Liu Lijing, *et al.* 2015. Revised sedimentary facies and lithostratigraphy of the upper Permian changing formation at Panlongdong, Xuanhan, Sichuan province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(2): 412~423(in Chinese with English abstract).
- Zhao Rui, Wu Yasheng, Jiang Hongxia, *et al.* 2014. Origin evidenced by statistic feature and orientation fabric in the Upper Permian Changxing Formation dolostone of Panlongdong, northeastern Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(6): 1 093~1 103(in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Zhou Jingao, *et al.* 2014. Types, characteristic, origin and exploration significance of reef-shoal reservoir [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 41(3): 257~267(in Chinese with English abstract).
- Zhao Xuefeng, Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, *et al.* 2009. Comparison of deeply and high-quality reef-bank facies reservoirs of

Puguang gas field in the northeast of Sichuan Basin with Tazhong gas field of Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(3): 390~403(in Chinese with English abstract).

Zhou Jingao and Deng Hongying. 2003. Appraisalment of inhomogeneous Ordovician carbonate reservoirs in Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 8(1~2): 68~73(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈琪, 胡文瑄, 李庆, 等. 2012. 川东北盘龙洞长兴组-飞仙关组白云岩化特征及成因[J]. *石油与天然气地质*, 33(1): 84~93.
- 胡宗全, 陈友莲. 1996. 碳酸盐储集岩的非均质性及其主要控制作用研究[J]. *矿物岩石*, 16(4): 135~141.
- 黎荣, 胡忠贵, 张航, 等. 2016. 川东卧龙河-洋渡溪区带长兴组台内礁滩沉积格局及有利储集体展布[J]. *沉积学报*, 34(5): 973~982.
- 李秋芬, 苗顺德, 江青春, 等. 2015. 四川宣汉盘龙洞长兴组生物礁沉积特征及成礁模式[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 45(5): 1322~1331.
- 李小燕, 王琪, 张瑞, 等. 2009. 川东北地区上二叠统盘龙洞生物礁储层特征及其主控因素分析[J]. *天然气地球科学*, 20(1): 63~69.
- 鲁新便, 王士敏. 2003. 应用变尺度分形技术研究缝洞型碳酸盐岩储层的非均质性[J]. *石油物探*, 42(3): 309~312.
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 2010. 深层超深层碳酸盐岩优质储层发育机理和“三元控储”模式[J]. *地质学报*, 84(8): 1087~1094.
- 马永生, 郭彤楼, 赵雪凤, 等. 2007. 普光气田深部优质白云岩储层形成机制[J]. *中国科学*, 37(增刊): 42~52.
- 牟传龙, 马永生, 王瑞华, 等. 2005. 川东北地区上二叠统盘龙洞生物礁成岩作用研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 25(3): 198~202.
- 强平, 曾伟, 陈景山, 等. 1998. 川东碳酸盐岩储层非均质性建模[J]. *石油与天然气地质*, 19(3): 205~210.
- 乔琳, 沈昭国, 方少仙, 等. 2007. 鄂尔多斯盆地靖边台及其周边地区中奥陶统马家沟组五 1-4 亚段储层非均质性主要控制因素[J]. *海相油气地质*, 12(1): 12~20.
- 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 2015. 海相碳酸盐岩储集层发育的主控因素[J]. *石油勘探与开发*, 42(5): 545~554.
- 孙赛男, 周进高, 郝毅, 等. 2011. 四川盆地环开江-梁平海槽长兴组-飞仙关组沉积模式[J]. *海相油气地质*, 16(3): 45~54.
- 王丹, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 2013. 建南地区长兴组礁滩储层特征及主控因素分析[J]. *岩石矿物学杂志*, 32(4): 538~548.
- 吴亚生, 姜红霞, 刘丽静, 等. 2015. 四川宣汉盘龙洞上二叠统长兴组沉积相与岩石地层精细划分[J]. *地质学报*, 89(2): 412~423.
- 赵锐, 吴亚生, 姜红霞, 等. 2014. 四川宣汉盘龙洞上二叠统长兴组白云岩组构定向与统计特征及其成因意义[J]. *地质学报*, 88(6): 1093~1103.
- 赵文智, 沈安江, 周进高, 等. 2014. 礁滩储集层类型、特征、成因及勘探意义[J]. *石油勘探与开发*, 41(3): 257~267.
- 赵雪凤, 朱光有, 张水昌, 等. 2009. 川东北普光地区与塔中地区深部礁滩体优质储层的对比研究[J]. *沉积学报*, 27(3): 390~403.
- 周进高, 邓红婴. 2003. 鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩储层非均质性评价[J]. *海相油气地质*, 8(1~2): 68~73.